



Control por rechazo activo de perturbaciones del nivel de liquido de un sistema de tanques acoplados

Pedro Teppa-Garran^{1*}, Miguel Bravo², Germain Garcia³

¹Departamento de Procesos y Sistemas, Universidad Simón Bolívar, Baruta, Estado Miranda, Caracas, Venezuela

²Coordinación de Ingeniería de Sistemas, Universidad Simón Bolívar, Baruta, Estado Miranda, Caracas, Venezuela

³LAAS, CNRS y Université de Toulouse, LAAS, INSA, F-31400 Toulouse, Francia

*Autor de correspondencia: pteppa@usb.ve

Resumen

Determinar un modelo matemático simple y confiable para los complejos sistemas industriales de hoy en día es una tarea difícil. En la obtención de un modelo matemático razonable son ignoradas ciertas propiedades inherentes del sistema. El control por rechazo activo de perturbaciones (ADRC) es un método que no requiere de un modelo matemático preciso del sistema, supone que los elementos no modelados de la dinámica y las perturbaciones externas pueden ser estimados a través de un observador de estado extendido (ESO) y posteriormente suprimidos en línea usando el estimado como parte de la ley de control. En este trabajo, el ADRC es aplicado a un proceso no lineal de fundamental importancia en la industria, como es el control de nivel de un sistema de tanques acoplados. Los resultados obtenidos demuestran la efectividad del método.

Palabras Claves

Control por rechazo activo de perturbaciones (ADRC), Observador de estado extendido (ESO), Tanques acoplados, Nivel de líquido

Abstract

Finding simple and reliable mathematical models for describing a complex process is a difficult task. In deriving a reasonably model, we frequently find necessary to ignore certain inherent properties of the system. Active disturbance rejection control (ADRC) is a method that does not require a detailed mathematical description of the system, it supposes that the unmodeled elements of the dynamics and external disturbances can be estimated trough an extended state observer (ESO), and then rejected online by adding the estimated in the control law. In this work, ADRC is applied to a non linear process of great importance in the industry, the liquid level control in the coupled tanks system. The results show the effectiveness of the method.

Keywords

Active disturbance rejection control, Extended state observer, Coupled Tanks, Liquid Level.

Introducción

El ADRC (Han, 1998, 1999; Gao et al., 2001) es una metodología relativamente nueva que posee un potencial interesante en la resolución de problemas de control de procesos industriales caracterizados por elevados niveles de incertidumbre. La mayoría de los procesos físicos reales, no son tan sólo no lineales y variantes en el tiempo, sino altamente inciertos. Hoy en día, es habitual tratar el diseño de controladores para esta clase de sistemas a través de las teorías de control robusto y de control adaptativo. Independientemente de la naturaleza de un sistema físico, su comportamiento no podrá representarse de manera adecuada por un solo modelo matemático. En efecto, si la ley de control es calculada sin ninguna preocupación particular sobre la base de un sólo modelo, será muy probable que la aplicación de ésta sobre el sistema real, no reproduzca el comportamiento observado preliminarmente sobre el modelo. El resultado será muy lejano al supuesto; incluso existirán ocasiones donde el controlador hace inestable el sistema real. La razón de estas discrepancias es atribuida a que por motivos de simplicidad, el modelo matemático del sistema real que sirvió en la concepción del controlador, descartó fenómenos como por ejemplo: las perturbaciones, las variaciones de ciertos parámetros y las dinámicas rápidas, tales fenómenos se juzgaron equivocadamente, que no revestían ninguna importancia en la síntesis del sistema de control. Una forma de evitar tal discrepancia en el comportamiento, consiste en calcular la ley de control, para una familia de modelos a la que supondremos pertenece el sistema real. Dicha familia estará constituida por un modelo nominal y por variaciones alrededor del mismo, denominadas incertidumbres. A tal familia la denominaremos modelo incierto. Por lo que, si el controlador se concibe de forma a satisfacer los objetivos impuestos a los diferentes modelos pertenecientes a la familia, tendremos la garantía de que el sistema real los cumplirá de igual forma. Estas ideas constituyen la esencia del paradigma de control robusto (Morari & Zafiriou, 1989; Zhou, 1994). Sin embargo, los niveles de incertidumbre que se pueden manejar con esta metodología, generalmente son inferiores a los que aparecen en los procesos reales y el desempeño del sistema de control se degrada a medida que existe un alejamiento de la situación nominal.

El control adaptativo posee un algoritmo que continuamente está identificando el modelo del proceso, utilizando su información entrada – salida y un segundo algoritmo de control que modifica sus parámetros en base a las fluctuaciones del modelo del proceso. Esto se denomina control adaptativo por modelo de referencia (MRAC). Este método ofreció resultados muy prometedores durante la década de los 70s y principios de los 80s (Landau, 1979; Harris & Billings, 1981) hasta que en (Egardt, 1979) se demostró que había problemas de inestabilidad en presencia de pequeñas perturbaciones. El comportamiento no robusto del control adaptativo fue muy controversial durante los primeros años de la década de los 80s cuando aparecieron más ejemplos que evidenciaban esta carencia de robustez en presencia de dinámicas no modeladas y perturbaciones acotadas (Ioannou & Kokotovic, 1983; Rohrs et al., 1985). A mediados de los 80s, varios rediseños y modificaciones fueron propuestos y analizados, dando origen a una nueva metodología, el control adaptativo robusto (Ioannou & Datta, 1991). Un controlador adaptativo será robusto, si se garantizan ciertas cotas en las señales del proceso (entradas, salidas, estados); en la presencia de determinadas clases de dinámicas no modeladas, perturbaciones acotadas y cotas en el error de desempeño. Resultados interesantes se lograron para procesos lineales y variantes en el tiempo (Tsakalis & Ioannou, 1993) y fueron extendidos a casos muy particulares de procesos no lineales, como por ejemplo (Kanellakopoulos et al. 1991). Hoy en día, la capacidad de robustez del control adaptativo continua siendo limitada.

Tanto el enfoque de control robusto como el de control adaptativo presuponen que la dinámica del proceso físico puede capturarse matemáticamente. Esta suposición no sólo es fundamental en las dos metodologías señaladas, sino que constituye la esencia de la teoría de control en los momentos actuales. Sin embargo, las exigencias en el control cada vez mayores, para los procesos de hoy en día, requieren una metodología basada en las premisas siguientes: (i) Poca dependencia del modelo matemático del proceso ya que éste no siempre se encuentra disponible en situaciones prácticas y (ii) Intuitiva y fácil de implementar.

Una clase de controlador que satisface en cierta medida las premisas previas, es el controlador proporcional-integral-derivativo (PID), él cual a pesar

de su simplicidad, aparece en el 90% de las aplicaciones industriales actuales de control (Aström & Hagglund, 1996). Sin olvidar, que fue inventado por Minorsky en 1922, esto es, hace alrededor de 90 años y las reglas para su sintonización, desarrolladas por Ziegler y Nichols, datan de la década de los 40s y continúan siendo ampliamente utilizadas hoy en día. No obstante, hay que acotar, que las crecientes demandas en exactitud, robustez y eficiencia; aunadas a las limitaciones inherentes al control PID, motivan la necesidad de mecanismos de control más convenientes y que continúen enmarcados dentro de las premisas anteriores.

El ADRC es un método que no requiere una descripción matemática detallada del sistema, supone que los elementos no modelados de la dinámica y las perturbaciones externas pueden estimarse en línea empleando un ESO y posteriormente ser cancelados a través de la ley de control.

En este trabajo se considera la aplicación del ADRC al control del nivel del líquido de un sistema de tanques acoplados que forma parte de los equipos con los que cuenta el Laboratorio de Sistemas de Control de la Universidad Simón Bolívar en Venezuela. El control del nivel de un líquido en tanques y el flujo entre ellos es un problema básico en la industria de procesos. Lo que se requiere es bombear líquidos, almacenarlos en tanques y luego bombearlos a otro tanque. Muchas veces los líquidos son procesados en los tanques mediante tratamientos químicos o mezclas, pero siempre el nivel del líquido debe ser controlado. Esta operación es fundamental en el procesamiento de alimentos, bebidas y lácteos, en la filtración y tratamiento de efluentes, en los sistemas de purificación de agua, en el procesamiento de químicos industriales, en calderas, en torres de destilación y tanques de mezcla. A menudo, los tanques pueden estar acoplados por lo que existe interacción entre los niveles de éstos, presentándose un comportamiento no lineal.

El artículo está organizado de la manera siguiente. La sección 2 presenta las nociones de base de la teoría ADRC. Posteriormente, en la sección 3 se describe matemáticamente el sistema de tanques acoplados. Finalmente, en la sección 4 se muestran tanto el diseño del ADRC como los resultados de la aplicación del mismo al control del nivel de líquido del sistema de tanques acoplados.

Fundamentos del ADRC

Con la intención de presentar las nociones de la teoría ADRC se considera un sistema dinámico no lineal, variante en el tiempo, de segundo orden descrito por la ecuación diferencial

$$\ddot{y}(t) = f(t, \dot{y}(t), w(t)) + bu(t), \quad (1)$$

donde w es la perturbación externa, u es la entrada, y es la salida y b es una constante real del sistema que se conoce indirectamente a través del estimado b_0 . La expresión $f(t, \dot{y}(t), w(t))$ o simplemente f representa la dinámica desconocida de la clase no lineal y variante en el tiempo que posee el sistema. Esto es, la única información que se requiere del sistema es su orden y el parámetro b_0 . El principio en el que se apoya el ADRC consiste en la estimación y posterior cancelación de f . Asumiendo que f es derivable, el sistema (1) puede representarse en la siguiente forma de estado extendida

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 + bu \\ \dot{x}_3 &= \frac{df}{dt} \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (2)$$

Un ESO de (2) estimará el vector $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [y \ \dot{y} \ f]^T$ y estará caracterizado por las ecuaciones

$$\begin{aligned} \hat{\dot{x}}_1 &= \hat{x}_2 + l_1(y - \hat{x}_1) \\ \hat{\dot{x}}_2 &= \hat{x}_3 + l_2(y - \hat{x}_1) + bu \\ \hat{\dot{x}}_3 &= l_3(y - \hat{x}_1) \end{aligned} \quad (3)$$

siendo l_1, l_2 y l_3 las ganancias del observador, las cuales se calculan de forma que el polinomio característico $s^3 + l_1s^2 + l_2s + l_3$ sea Hurwitz. Por razones prácticas, todos los polos del ESO se localizan en $-w_0$ (Gao, 2003), lo que resulta en

$$s^3 + l_1s^2 + l_2s + l_3 = (s + w_0)^3, \quad (4)$$

siendo w_0 el ancho de banda del ESO y su ganancia igual a

$$L = [l_1 \ l_2 \ l_3]^T = [3w_0 \ 3w_0^2 \ w_0^3]^T. \quad (5)$$

Generalmente, mientras más elevada sea la ganancia del observador, más exacta será la estimación (Zheng et al. 2007). Sin embargo, debe tenerse presente que las ganancias altas también incrementan la sensibilidad al ruido de medición. Por lo que deberá establecerse un compromiso entre las especificaciones de desempeño y de tolerancia al ruido. El ADRC cancelará el efecto de f empleando \hat{x}_3 a través de la ley de control

$$u = \frac{k_1(r - \hat{x}_1) - k_2\hat{x}_2 - \hat{x}_3}{b_0} \quad (6)$$

donde r es la señal de referencia y k_1, k_2 las ganancias del controlador seleccionadas de forma que el polinomio $s^2 + k_2s + k_1$ sea Hurwitz. En forma similar al diseño del ESO, los polos del controlador se suelen localizar en $-w_c$ (Gao, 2003) lo que origina

$$s^2 + k_2s + k_1 = (s + w_c)^2, \quad (7)$$

con w_c el ancho de banda del controlador y su ganancia igual a

$$K = [k_1 \ k_2] = [w_c^2 \ 2w_c]. \quad (8)$$

Para determinar las frecuencias w_c y w_o se suele emplear como estimado inicial la relación heurística (Gao, 2003)

$$w_o = 3 \text{ a } 5 \text{ veces } w_c. \quad (9)$$

Al reemplazar (6) en (1) el sistema a lazo cerrado se transforma en

$$\ddot{y} = (f - \hat{x}_3) + k_1(r - y) - k_2\dot{y}. \quad (10)$$

Note que el primer término a la derecha de (10) es insignificante, por lo que el ADRC logra compensar el efecto de f en tiempo real.

Sistema de tanques acoplados

El sistema de tanques acoplados se muestra en la Fig.1, y su esquema de conexión en la Fig. 2, donde la salida de la bomba esta conectada a la entrada del tanque 1. Aplicando las ecuaciones de balance de flujo, el modelo matemático no lineal del sistema de tanques resulta en

$$A_1 \frac{dh_1(t)}{dt} = q(t) - C_1 \sqrt{h_1(t)}. \quad (11)$$

$$A_2 \frac{dh_2(t)}{dt} = C_1 \sqrt{h_1(t)} - C_2 \sqrt{h_2(t)}. \quad (12)$$

Con $C_1 = Ad_1\sqrt{2g}, C_2 = Ad_2\sqrt{2g}, A_1$ es el área transversal del tanque 1, A_2 es el área transversal del tanque 2. Ad_1 es el área transversal del orificio que comunica el tanque 1 con el tanque 2 y Ad_2 es el área transversal del orificio que comunica el tanque 2 con el repositorio. El modelo no lineal en variables de estado del sistema de tanques se muestra en (13) donde se hace corresponder el vector de estado a los niveles de líquido en ambos tanques $[h_1 \ h_2]^T$, la señal de control al flujo $q(t)$ y la salida controlada se escoge como el nivel de líquido en el segundo tanque.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (13)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{C_1}{A_1}\sqrt{x_1}(t) & 0 \\ \frac{C_1}{A_2}\sqrt{x_1}(t) & -\frac{C_2}{A_2}\sqrt{x_2}(t) \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\beta}{A_1} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \ 1]$$

Donde β representa el coeficiente de flujo de la bomba, este parámetro permite efectuar la conversión entre los voltios que se aplican a la entrada de la bomba y el flujo. Los niveles máximos en los tanques 1 y 2 son de 30 cm. Se ha escogido un punto de operación en la zona intermedia de este rango para efectuar la linealización del modelo (13). Esto permite obtener la función de transferencia del sistema de tanques como:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\frac{\beta Ad_1 \sqrt{2g}}{2A_1^2 \sqrt{H_1}}}{\left(s + \frac{Ad_1 \sqrt{2g}}{2A_1 \sqrt{H_1}}\right) \left(s + \frac{Ad_2 \sqrt{2g}}{2A_2 \sqrt{H_2}}\right)} \quad (14)$$

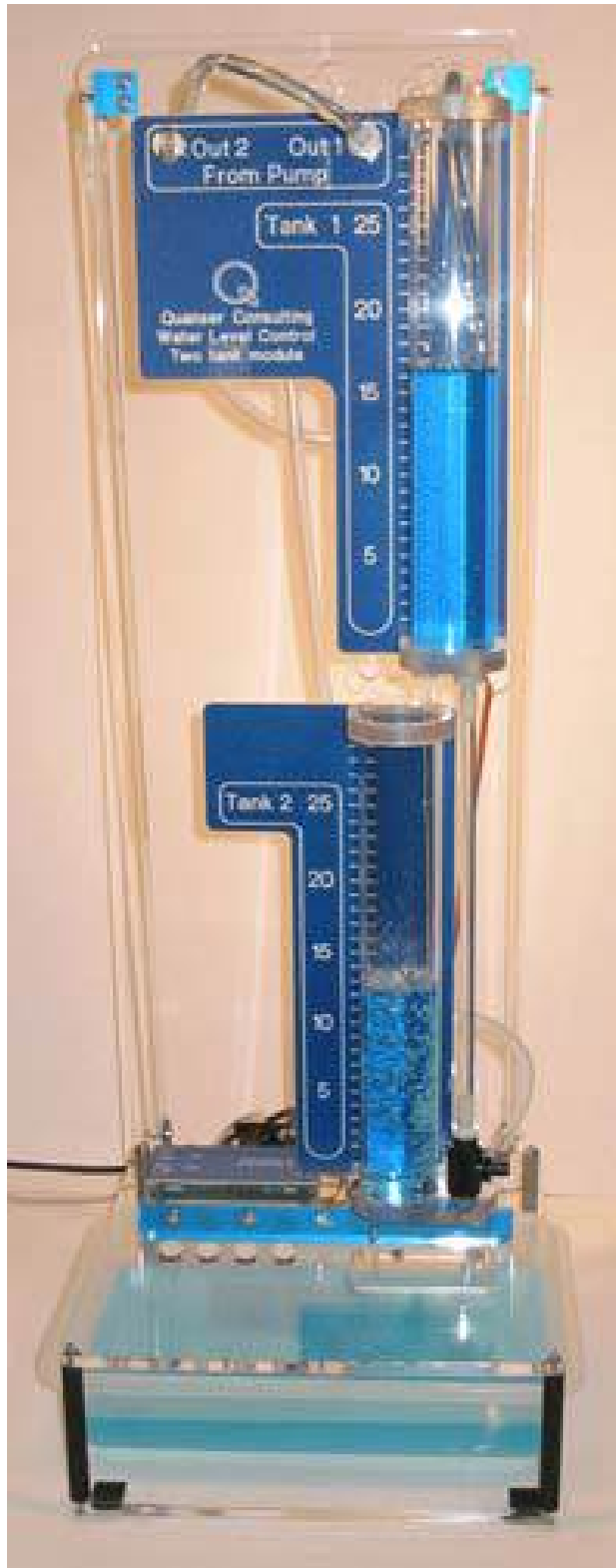


Figura 1. Sistema de tanques acoplados.

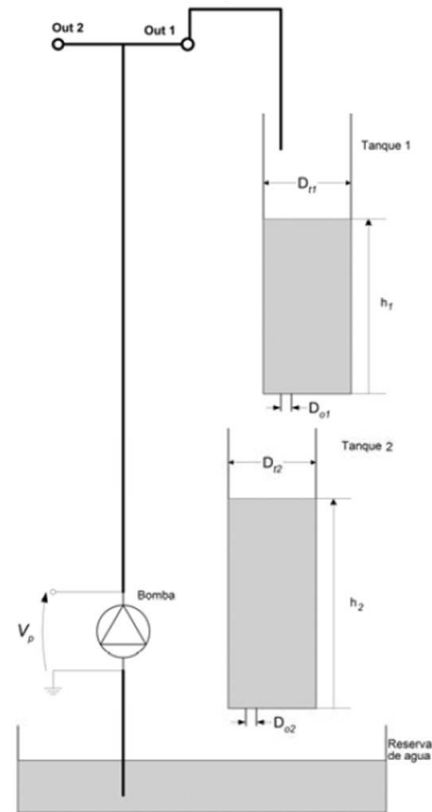


Figura 2. Interconexión habitual de los tanques.

Los valores de los parámetros físicos del sistema de tanques son descritos en la Tabla 1. Los cálculos siguientes

$$\begin{aligned}
 A_1 &= A_2 = \pi(4,445/2)^2 = 15,52[\text{cm}^2], \\
 A_{d1} &= \pi(0,635/2)^2 = 0,317[\text{cm}^2], \\
 A_{d2} &= \pi(0,476/2)^2 = 0,178[\text{cm}^2], \\
 \beta &= 4[\text{cm}^3/(\text{sV})], \\
 g &= 981[\text{cm}/\text{s}^2], \\
 \bar{H}_1 &= \bar{H}_2 = 15[\text{cm}],
 \end{aligned}$$

permiten expresar (14) en la forma nominal.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{0,0169}{s^2 + 0,1312s + 0,0043} \quad (15)$$

Diseño del ADRC y resultados

Inicialmente se expresa (15) como

$$\ddot{y}(t) = f + 0,0169u(t) \quad (16)$$

Tabla 1. Parámetros físicos del sistema de tanques.	
Especificación	Valor
Dimensiones de la planta	(30.05)x(33.7)x(91.05 [cm])
Constante de flujo de la bomba	4 [cm ³ /s/V]
Flujo máximo de la bomba	100[cm/s]
Diámetro del orificio out1	0.635 [cm]
Diámetro del orificio out2	0.476 [cm]
diámetros tanques 1 y 2	4.445 [cm]
Niveles máximos en los tanques 1 y 2	30 [cm]

donde f representa la perturbación generalizada del sistema, la misma contiene cualquier diferencia entre el modelo y el sistema real, incluyendo las perturbaciones externas. En el caso general es una función no lineal, variante en el tiempo. Seleccionando el vector de estado como $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [y \ \dot{y} \ f]^T$, el sistema (16) puede describirse a través de

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dot{f} \quad (17)$$

$$y = [1 \ 0 \ 0] x$$

con b_0 un estimado de b . El ESO de (17) es

$$\hat{\dot{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \hat{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix} (y - \hat{y}) \quad (18)$$

$$\hat{y} = [1 \ 0 \ 0] \hat{x}$$

La ley de control ADRC es

$$u = \frac{k_1(r - \hat{x}_1) - k_2\hat{x}_2 - \hat{x}_3}{b_0} \quad (19)$$

y al reemplazarla en (16), reduce el sistema original a la forma lineal

$$\ddot{y} = k_1(r - \hat{x}_1) - k_2\hat{x}_2 \quad (20)$$

Las ganancias del ESO se seleccionan a partir de (5) y las del controlador como

$$K = [k_1 \ k_2] = [w_c^2 \ \zeta w_c] \quad (21)$$

Con el objeto de determinar los valores de b_0 en (17-19), las ganancias del ESO en (5) y las del controlador en (21). Se efectúa un conjunto de simulaciones considerando el sistema de tanques real de la Fig. 1 y unos requerimientos de desempeño a lazo cerrado tales que el tiempo de establecimiento no supere un minuto y el sobre pico porcentual no pase de uno por ciento. La Fig. 3 muestra algunas de las distintas simulaciones que se realizaron. De la misma se desprende que el empleo de $b_0 = 0.00845$, $w_c = 0.5$ y $w_0 = 1$ satisfacen los requerimientos exigidos.

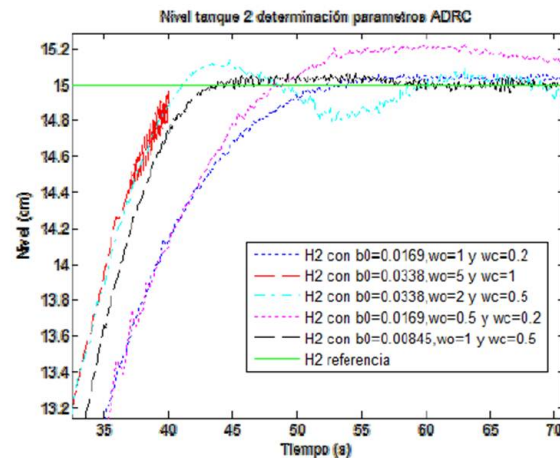


Figura 3. Determinación de los parámetros del controlador ADRC para el control del nivel del tanque 2.

Comentario 1: El procedimiento de sintonización del ADRC también se realizó empleando el modelo no lineal (13) y el ambiente Matlab/Simulink®. En este caso se usó el algoritmo ODE 1 para resolver las ecuaciones diferenciales, un tiempo de muestreo de 0.02 s. y se le adicionó ruido blanco de amplitud 0.001 a la salida para simular los efectos del ruido de medición. Los resultados son muy similares a los determinados empleando el sistema real.

Comentario 2: La primera selección de los parámetros del ADRC fue a partir de (16) $b_0 = b = 0,0169$. Y luego se emplearon las ecuaciones provenientes de las especificaciones. Del sobre pico porcentual, $PO \leq 1\%$ a través de la expresión

$$\zeta = \sqrt{(\ln PO/100)^2 / [\pi^2 + (\ln PO/100)^2]}$$

se obtiene la relación $0,83 \leq \zeta \leq 1$. Del tiempo de establecimiento t_s (criterio 5%) resulta $w_c = 3/(t_s \zeta)$ y una guía para la selección del ancho de banda del ESO es (9). No obstante, las simulaciones con el sistema real mostraron que los valores predichos por estas fórmulas, si bien son útiles en una etapa inicial, al final discreparon de los valores de sintonización obtenidos experimentalmente con el sistema real.

La Fig.4 muestra el desempeño del ADRC en el sistema de tanques acoplados: Se consideró tanto el sistema real (Fig. 1) como el sistema simulado a través de (13) (ver comentario 1). El experimento consiste en pasar la referencia de un nivel de 15 cm en el tanque 2 a un nivel de 5 cm en el instante $t = 100$ s. La Fig. 5 presenta el mismo experimento anterior, pero ahora se compara el desempeño del ADRC con el de un PID con mecanismo de antiembalamiento y constantes $k_P = 1,3$, $t_I = 20$ y $t_D = 20$.

En la Fig. 6 se compara nuevamente el desempeño del ADRC y el PID en el sistema de tanques, pero ahora el sistema arranca en la configuración de la Fig. 2, en $t = 100$ s pasa a la de la Fig. 7 donde la salida de la bomba alimenta tanto el tanque 1 como el tanque 2 y en $t = 200$ s regresa a la interconexión inicial. Este experimento permite modelar una perturbación de forma trapezoidal que opera en el intervalo $[100;200]$, ocasionando la disminución del flujo de entrada al tanque 1 y la aparición de un flujo directo en el tanque 2. Finalmente, la tabla 2 ilustra el desempeño del ADRC y el PID a través del cálculo de unos criterios considerando todavía el experimento de la Fig. 6. Los criterios seleccionados son el sobre pico, la integral del cuadrado del error (diferencia entre referencia y salida) y el valor RMS (eficaz) de la señal de control.

Tabla 2. Comparación entre el ADRC y un PID cuando los tanques cambian su interconexión

	Sobre pico	ISE	u_{RMS}
ADRC	0.44	3417	7.43
PID	0.41	4177	8.77

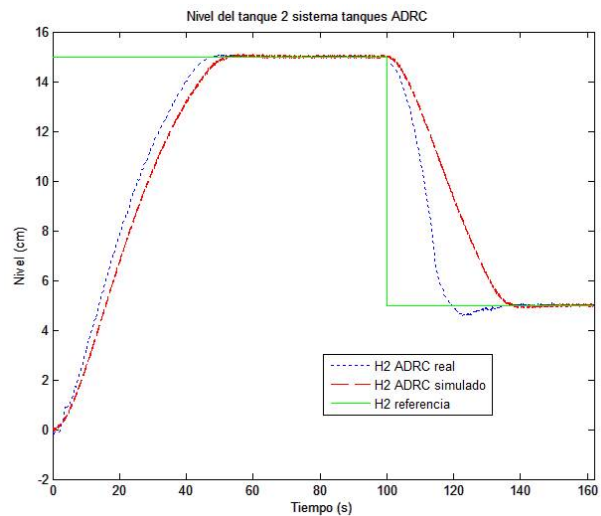


Figura 4. Comparación entre el ADRC con el sistema real y el ADRC con el sistema simulado para un cambio en la señal de referencia.

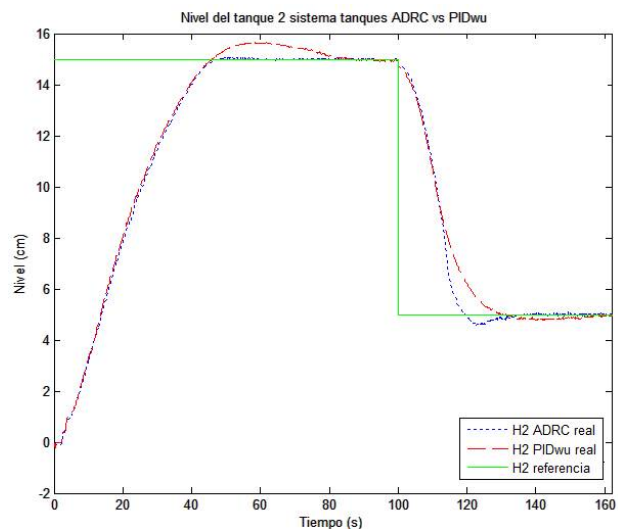


Figura 5. Comparación entre el ADRC y un PID usando el sistema real y considerando un cambio en la señal de referencia.

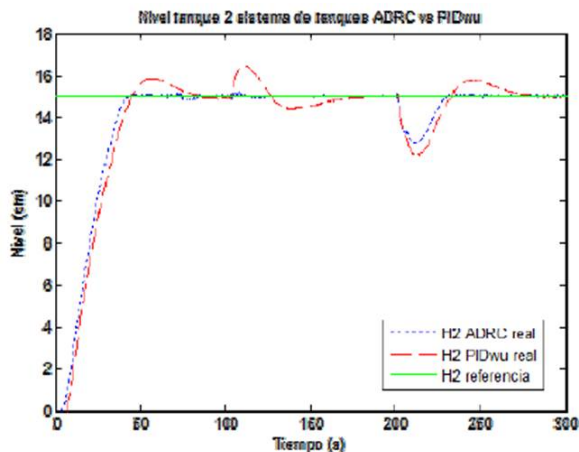


Figura 6. Comparación entre el ADRC y un PID considerando un cambio en la interconexión del sistema de tanques acoplados.

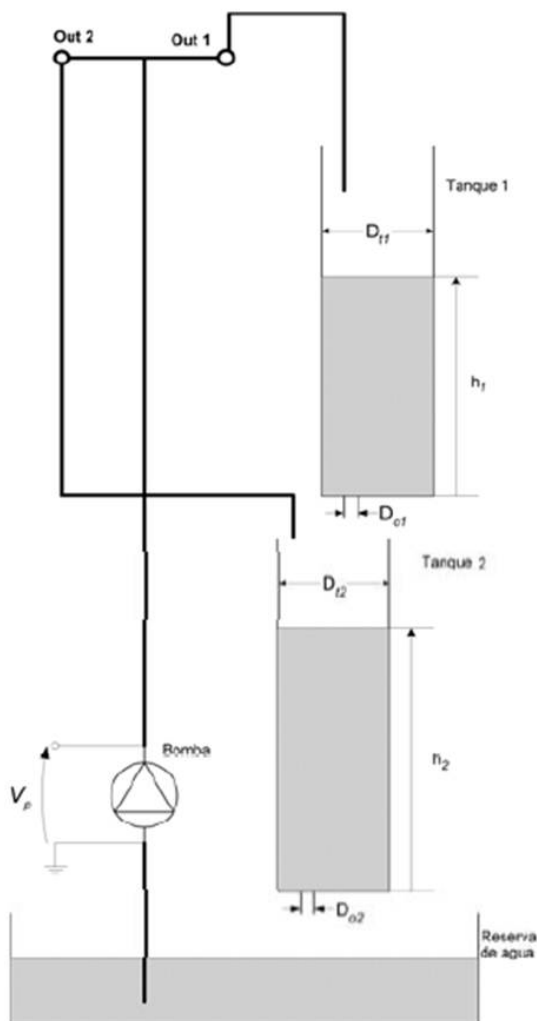


Figura 7. Interconexión modificada de los tanques.

Conclusiones

En este trabajo se consideró la aplicación del ADRC al control del nivel de líquido en un sistema de tanques acoplados. Diversos experimentos efectuados considerando modificaciones en el modelo y perturbaciones con el sistema real confirman la efectividad del método y su mejor desempeño ante un esquema de control convencional.

Bibliografía

- Aström, K. and Hagglund, (1996). PID Control, The Control Handbook, Levine, W. Ed. P. 198, CRC Press.
- Egardt, B., (1979). Stability of Adaptive Controllers, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. 20, Springer-Verlag, Berlín.
- Gao, Z., Y. Huang y J. Han, (2001). An alternative paradigm for control system, En actas de IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, USA.
- Gao, Z. (2003). Scaling and bandwidthparameterization based controller tuning, En actas de American Control Conference, 4989-4996, Denver, USA.
- Han, J. (1998). Auto-disturbance rejection control and its applications, Control and Decision, 13: 19-23. (En chino)
- Han, J. (1999). Nonlinear design methods for control systems, En actas de 14th IFAC World Congress, Beijing, China.
- Harris, C. y Billings S., Eds. (1981). Self Tuning and Adaptive Control: Theory and Applications, Vol. 47, Peter Perigrinus, London.
- Ioannou, P. y P. Kokotovic, (1983) Adaptive Systems with Reduced Models, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. 47, Springer-Verlag, New York.
- Ioannou, P. y A. Datta, (1991). Robust adaptive control: a unified approach. Proc. of the IEEE, 79(12):1735-1768.
- Kanellakopoulos, I., P. Kokotovic y A. Morse, A., (1991). Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable Systems,. IEEE Trans. Auto, Control, 36: 1241-1253.
- Landau, I., (1979). Adaptive Control: The Model Reference Approach, Marcel Dekker, New York.
- Morari, M. y E. Zafriou, (1989). Robust Process Control. Prentice Hall Inc.

Rohrs, C., L. Valavani, M. Athans y G. Stein, (1985). Robustness of continuous time adaptive control algorithms in the presence of unmodeled dynamics. *IEEE Trans. Autom. Control*, 30(9): 881-889.

Tsakalis, K.S. y P. Ioannou, (1993). *Linear Time Varying Systems: Control and Adaptation*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Zheng, Q., L. Gao y Z. Gao, (2007), On stability analysis of active disturbance rejection control for nonlinear time-varying plants with unknown dynamics, *Proc. of the IEEE Conference on Decision and Control*, LA, USA.

Zhou, K. (1998). *Essentials of Robust Control*. Prentice Hall Inc.